

花蓮縣第 58 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：魔法光學-探討光的折射現象

關鍵詞：一字雷射、彎曲雷射、干涉條紋（最多三個）

編 號：

（由教育處統一編列）

製作說明：

- 1.說明書封面僅寫科別、組別、作品名稱及關鍵詞。
- 2.編號由教育處統一編列。
- 3.封面編排由參展作者自行設計。

摘要

研究雷射光在玻璃棒中的行進路徑，並探討雷射光通過玻璃棒時所產生的折射現象。結果發現：當水平雷射光入射垂直立於地面玻璃棒時，原先的雷射光點水平散開成「一」字狀，且玻璃棒越細，散開的一字越長，即散開的角度較大。當雷射光非垂直入射玻璃棒時(玻璃棒傾斜)，折射光是彎曲的，且玻璃棒越細或是傾斜角度越大，折射光彎的幅度就會越大。當雷射光通過細玻璃棒時，投射出干涉條紋，我們成功解決此干涉條紋的形成原因，並找到消除干涉條紋的方法。

壹、 研究動機

上學期有物理系教授來學校演示了一堂有關光學的課程，當時雷射光通過光柵片時，折射光是散開成「一」字狀，而不是一個雷射光點，還分成一節一節的。且當光柵片傾斜時，折射出的光是彎曲的，傾斜程度越大，光越彎曲。

我們覺得這個折射現象十分有趣，也想進一步了解其形成原因，因此我們開始設計了以下實驗。



圖 1 光通過光柵片時彎曲的情形

圖 2 光通過光柵片時分節的情形

貳、 研究目的

- 一、 研究雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同。
- 二、 研究雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，散開角度的不同。
- 三、 研究雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，上揚角度的不同。

參、 研究設備及器材

- 一、 自製圓柱形測量箱:(厚紙板、玻璃棒、影印量角器、熱熔膠槍、熱溶膠條、三秒膠)。
- 二、 模擬玻璃棒的保麗膠模形:(保麗膠、硬化劑、紅色色膏、培養皿、蠟、紙筒、量筒、滴管、容器、熱熔膠槍、熱溶膠條)。



圖 3 灌模所需的材料

三、 自製磨平機:(電風扇馬達、轉軸、木板、螺絲起子)。



圖 4 自製旋轉磨平機



圖 5 保麗膠模型

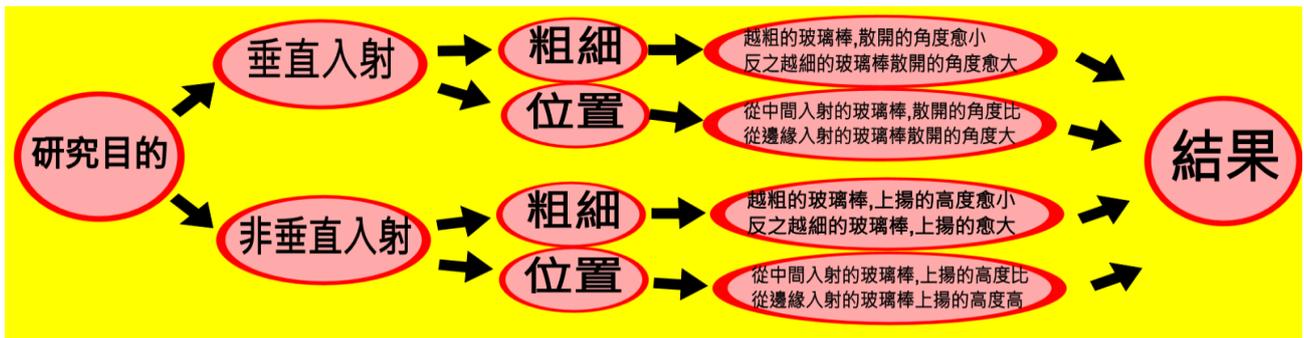
四、 相機、厚紙板、膠帶、美工刀、剪刀、壓克力、雷射頭、電池、鑽頭、木板、培養皿、紅墨水、滴管、砂紙、雙面膠。

五、 煙霧箱：壓克力、線香。



圖 6 使用磨平機圖 7 製作相機腳架

肆、研究過程與方法



一、研究雷射光垂直入射不同粗細的玻璃棒的中心或旁邊時，散開角度的不同。

(一) 研究一的實驗步驟:

1. 組裝圓柱形測量箱，並用二層黑色垃圾袋覆蓋並固定。
注意：因為不同亮度會使得光的明顯度不同，所以圓柱形測量箱內的亮度固定在 1.31~1.33LUX 之間。
2. 使用熱融膠將釣魚線及玻璃棒連接，並將玻璃棒插在黏土上。
注意:雷射光入射到玻璃棒的光點，必須在圓柱形測量箱的中心上。
3. 用雷射光照玻璃棒，若投射出的光為水平，則玻璃棒已垂直立於地面。
4. 依序測量直徑 10mm、8mm、7mm、6mm、4mm 的玻璃棒，並拍照記錄。

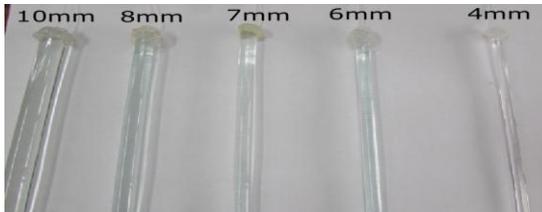


圖 8：實驗用的不同粗細玻璃棒

5.待測數據:

- (1)雷射光通過每根玻璃棒中心點時，在後方布幕散開的角度。
- (2)雷射光通過每根玻璃棒最右邊時，在後方布幕散開的角度。
- (3)雷射光通過每根玻璃棒最右邊時，在後方布幕散開的角度。

註:如圖9、10當雷射光通過玻璃棒,在圓柱形測量箱散開的一字,如果散開的光對稱於中間軸線,則是雷射光打到玻璃棒中央;

如果雷射光移動到玻璃棒邊緣,投射些微光亮擦邊玻璃棒直接打在圓柱形測量箱而產生亮點,則是雷射光打到邊緣.

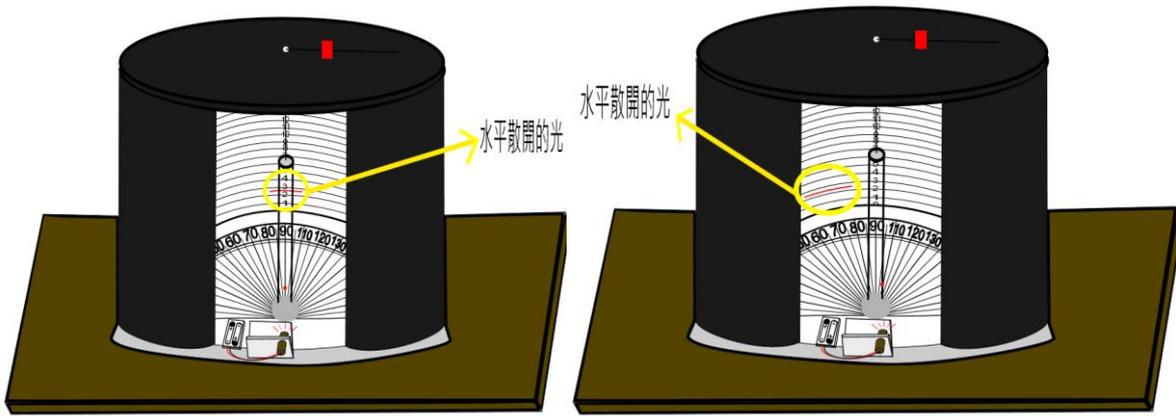


圖 9:玻璃棒中間入射，雷射散開對稱於中軸線圖 10:玻璃棒右邊入射，雷射向左偏折

二、研究雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，散開的角度和上揚的角度。

(一)研究二、三的實驗步驟:

1. 裝置如實驗一。
2. 使玻璃棒傾斜成和桌面夾角 70 度、50 度、30 度數據，並拍照記錄。
注意:雷射光入射到玻璃棒的光點，必須在圓柱形測量箱的中心上。
3. 依序測量直徑 10mm、8mm、7mm、6mm、4mm 的玻璃棒。
4. 待測數據
 - (1) 雷射光通過每根玻璃棒 70、50、30 度的中心時散開的角度。
 - (2) 雷射光通過每根玻璃棒 70、50、30 度的中心時二邊上揚的角度。

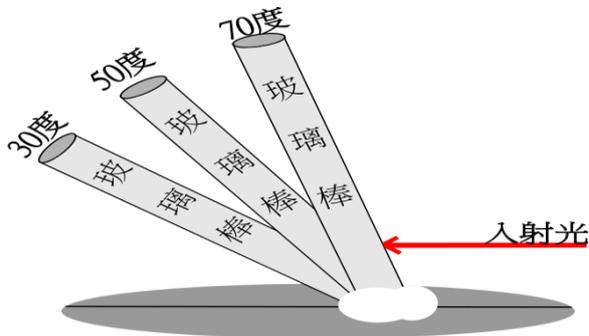


圖 11：雷射光水平入射玻璃棒，不同傾斜角度入射示意圖

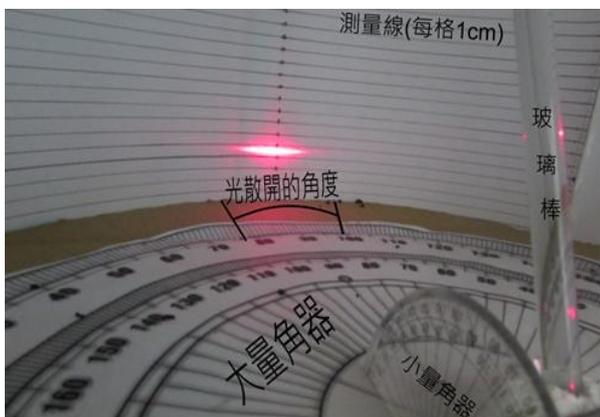


圖 12：在圓柱形測量箱測量散開角度

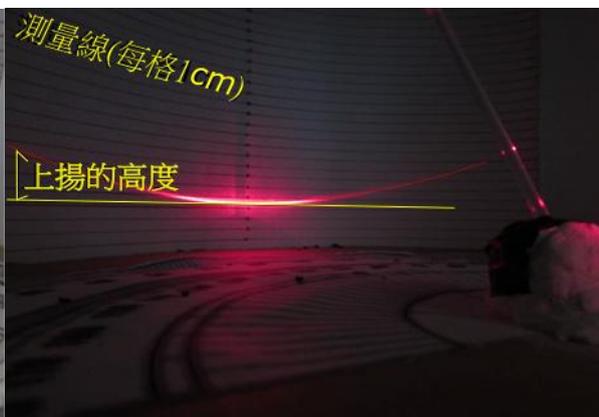


圖 13：在圓柱形測量箱測量上揚高度

說明：實際上測量到的數據是雷射光在圓柱形測量箱中散開後兩端的上升高度(cm)
 代入三角函數 $\tan(\text{上揚角度}) = \text{上揚高度} / \text{圓柱形測量箱半徑}$ 再使用 \tan 反三角函數，
 就可以求出上揚的角度

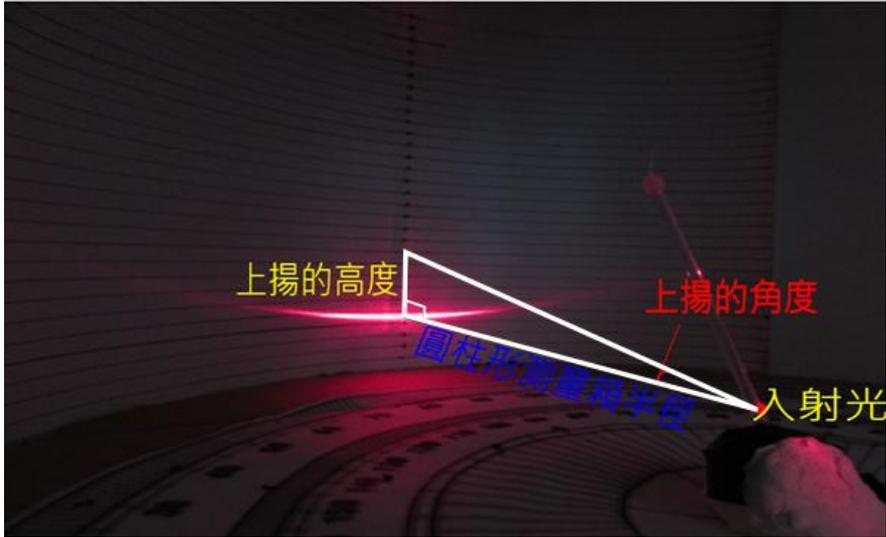


圖 14：測量上揚高度和上揚角度的關係圖

伍、 研究結果

一、 玻璃棒垂直於桌面，雷射光從不同粗細玻璃棒中央及右邊入射，散開角度測量

玻璃棒垂直於桌面，雷射光從不同粗細玻璃棒中央及右邊入射，散開角度測量圖表

	右邊入射	中心入射
4mm	89	74
6mm	70	42
7mm	65	34
8mm	58	32
10mm	48	25

表 1：雷射光分別從玻璃棒中央和右邊入射，不同粗細的玻璃棒使雷射光散開不同的角度。

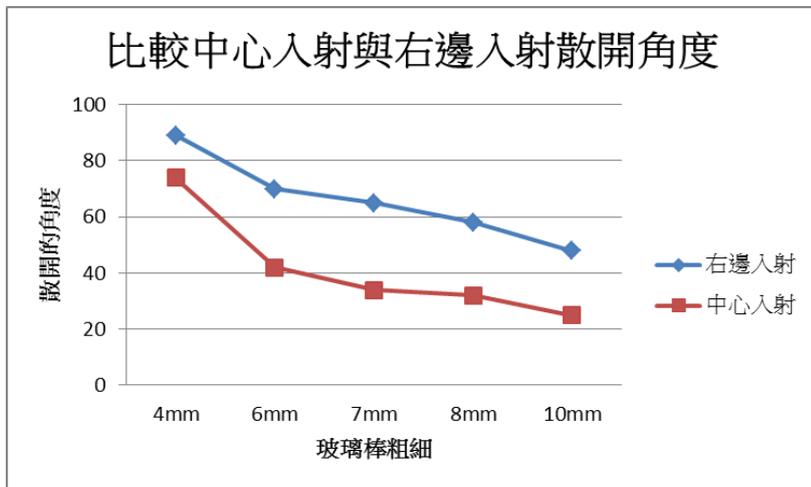


圖 15：雷射光分別從玻璃棒中央和右邊入射，散開的角度

綜觀圖 15，可發現:

- 1.玻璃棒越細，散開的角度越大。越粗則相反。
- 2.右邊入射較中間入射散開的角度大。

因為玻璃棒最細只有 4mm，因此使用了有機玻璃 4mm、3mm、1.8mm、1.5mm、1mm 測量散開的角度。

注意:有機玻璃屬於壓克力，折射率和玻璃不同，因此兩者無法整合比較。

不同粗細有機玻璃棒散開的角度實驗數據(中心入射):

有機玻璃棒粗細	散開的角度
1.5mm	149 度
1.8mm	142 度
3mm	95 度
4mm	62 度

表 2:雷射光從有機玻璃棒中央入射。不同粗細的玻璃棒使雷射光散開不同的角度。

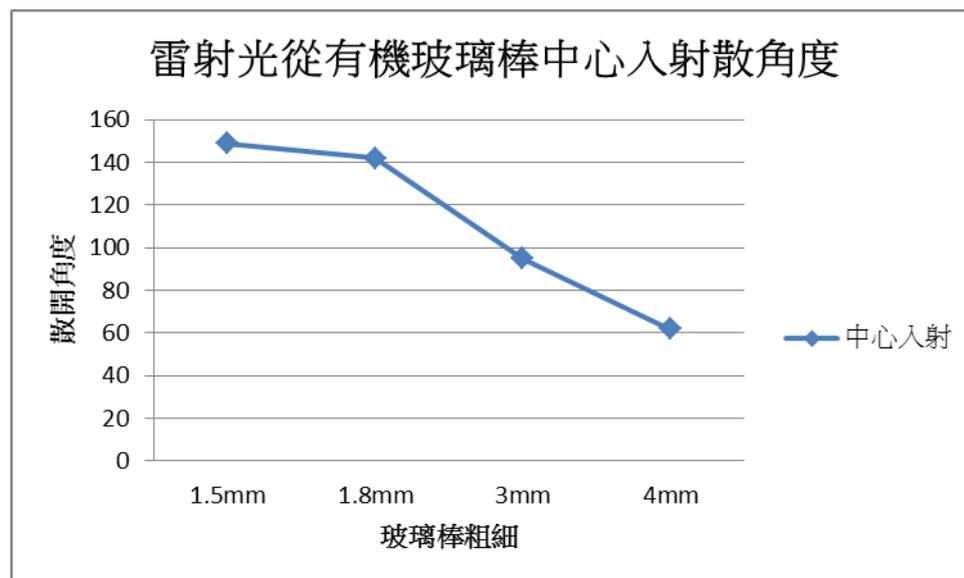


圖 16:雷射光從有機玻璃棒中央入射。不同粗細的玻璃棒使雷射光散開不同的角度。

由圖 16 可知越細的有機玻璃棒，散開的角度越大，和玻璃棒的特性類似。

直徑同為 4mm 時，玻璃棒把雷射光散開的角度明顯比有機玻璃棒的大。

因為有些有機玻璃棒過細，導致雷射光和有機玻璃棒一樣粗，只能測量到中心入射，無法測量由最右邊入射。

雷射光垂直入射有機玻璃棒右側邊緣散開角度實驗數據:

有機玻璃棒粗細	右邊入射
4mm	82 度
3mm	100 度

表 3:雷射光垂直入射有機玻璃棒右側邊緣散開角度

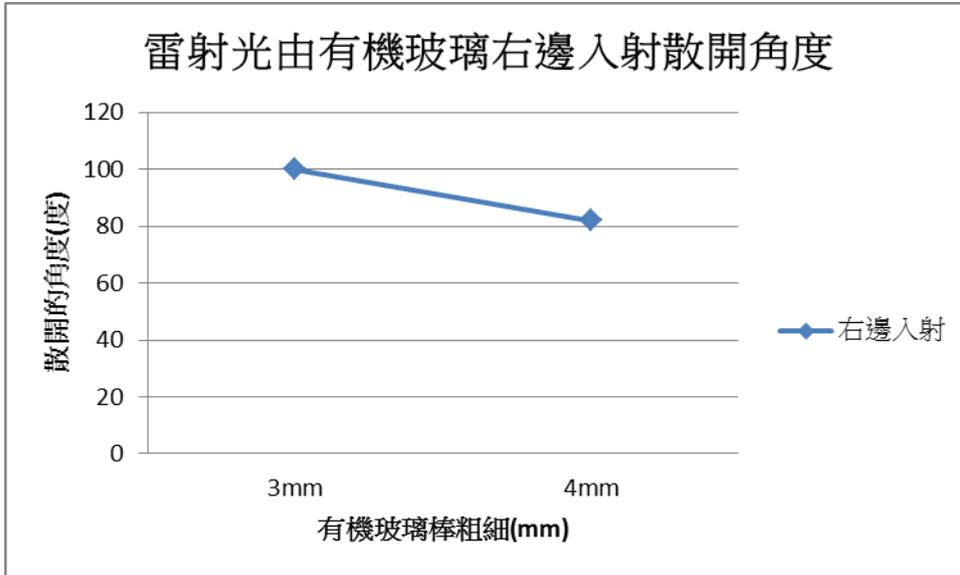


圖 17:雷射光垂直入射有機玻璃棒右側邊緣散開角度

由圖 17 中可看到，從有機玻璃棒最右邊入射較由正中間入射散開的角度大。和玻璃棒特性類似，直徑同為 4mm 時，玻璃棒把雷射光散開的角度也比有機玻璃棒的大。

二、雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒時，散開角度的測量

雷射光非垂直入射不同粗細的玻璃棒中央時散開的角度實驗數據:

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
中 30	70	66	64	59	48
中 50	68	65	62	57	44
中 70	67	63	60	49	42
右 30	50	55	63	60	60
右 50	67	65	68	63	69
右 70	83	78	77	77	77

表 4:雷射光從正中央及右邊入射不同傾斜角度玻璃棒散開的角度

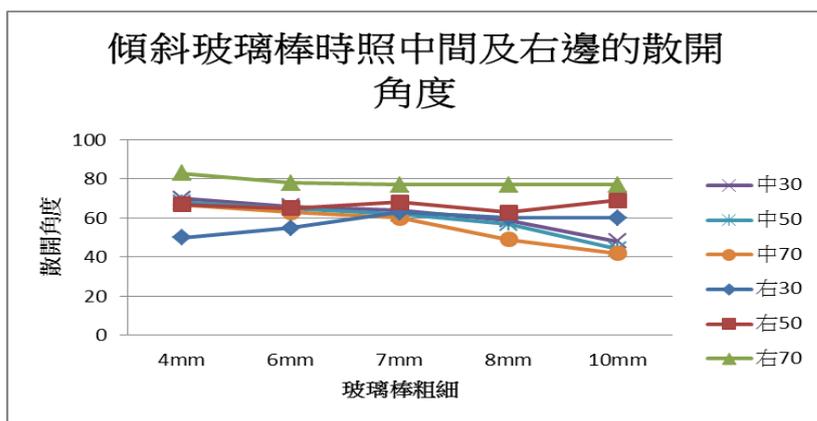


圖 18:雷射光從正中央入射不同傾斜角度玻璃棒散開的角度
由圖 18 可知:

- (一)不論玻璃棒傾斜幾度，只要玻璃棒越細，散開角度越大。
- (二)不論玻璃棒粗細，傾斜角度越大，散開的角度越大。
- (三)雷射光從右邊入射不同傾斜角度玻璃棒散開的角度，傾斜 30 度的數據及傾斜 50 度的數據很詭異，推測是因為玻璃棒越傾斜，反射劑量越多，折射劑量較少，我們用相同標準測量折射張開角度時，看到的角度就比較小。

三、 研究雷射光非垂直入射玻璃棒不同位置時，上揚角度的不同

雷射光非垂直入射玻璃棒中間上揚角度實驗數據:

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
30	15.9	3.3	3.3	1.9	1
50	6.2	2.1	1.7	1.2	0.4
70	2.7	1.6	1.1	1	0.2

表 5 雷射光入射不同傾斜角度粗細玻璃棒中間上揚角度

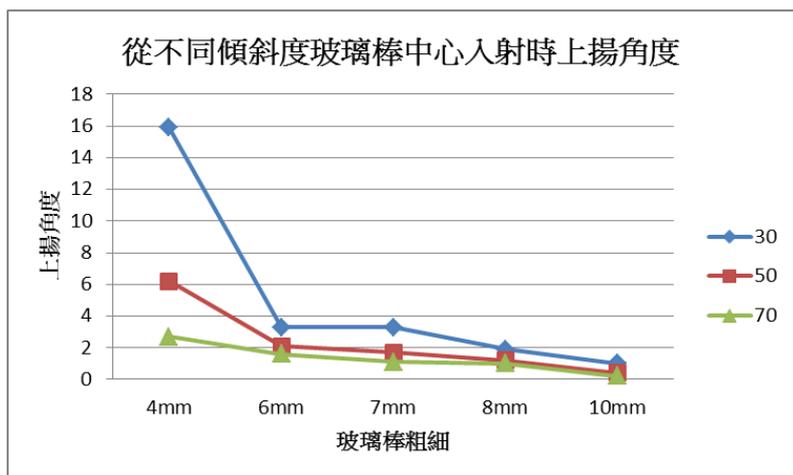


圖 19 雷射光非垂直入射不同粗細玻璃棒中間上揚角度

由圖 19 可發現玻璃棒越細，折射光上揚的角度越大，越粗則相反。且傾斜越大，散開的角度也越大。

雷射光非垂直入射玻璃棒右邊上揚角度實驗數據:

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
30	41.4	40.1	39.1	37.9	34.4
50	34.8	34	33.5	31.4	30
70	32.8	32.6	30	16.4	14.8

表 6：雷射光入射不同傾斜角度粗細玻璃棒右邊上揚角度

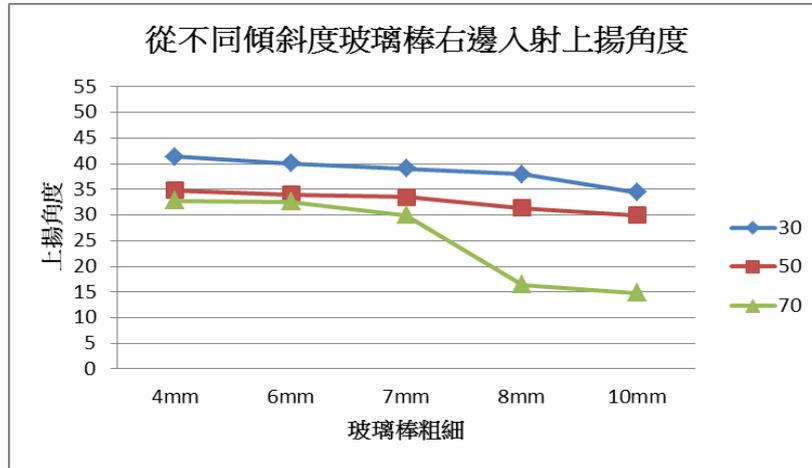


圖 20：雷射光非垂直入射不同粗細玻璃棒右邊上揚角度

由圖 20 可發現玻璃棒越細，折射光上揚的角度越大，越粗則相反。

且傾斜越大，散開的角度也越大，而且從右邊入射上揚的角度都比從中間入射的大。

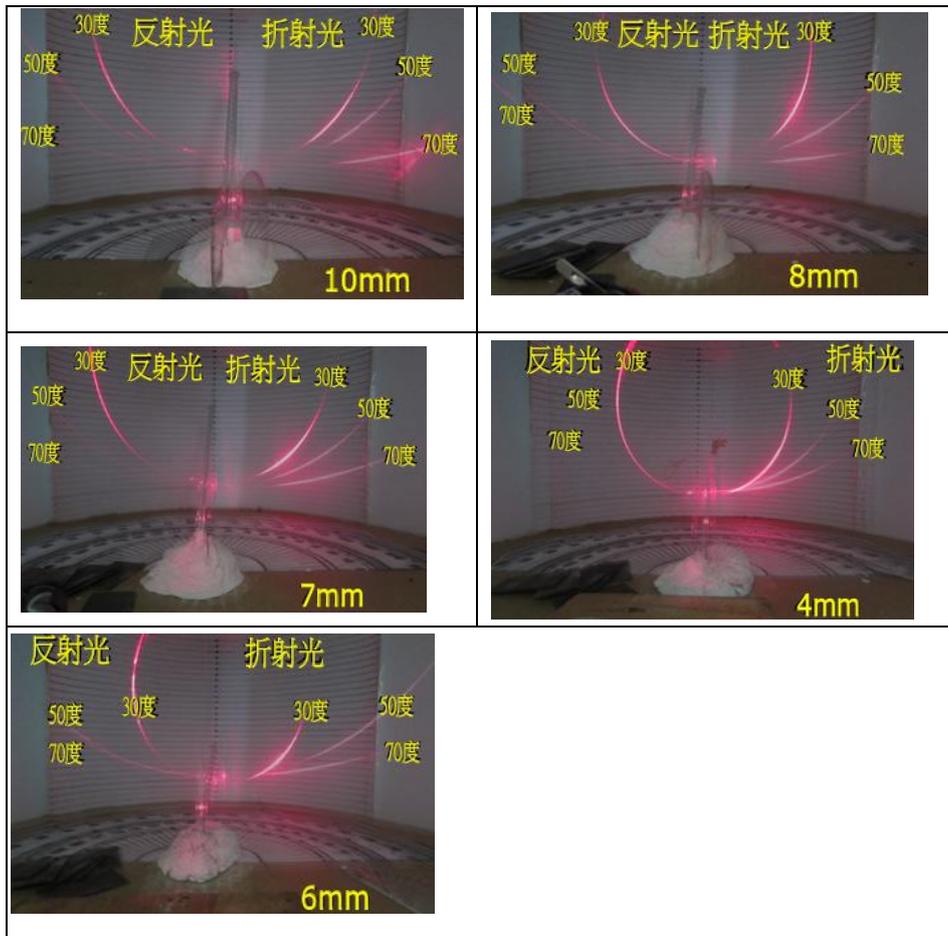


圖 21 在不同的角度照射玻璃棒左邊時呈現的圖像疊加

陸、討論

為了說明雷射光通過玻璃棒散開成「一」字，分別把雷射光打入裝紅墨水的培養皿和自製的紅色保麗膠(壓克力)模型，觀察雷射光從空氣射介質中的偏折狀況。經由折射定律的規範，可以解釋雷射光前進的路徑及其他相關現象。

一、 探討水及保麗膠(壓克力)模型的折射路徑:

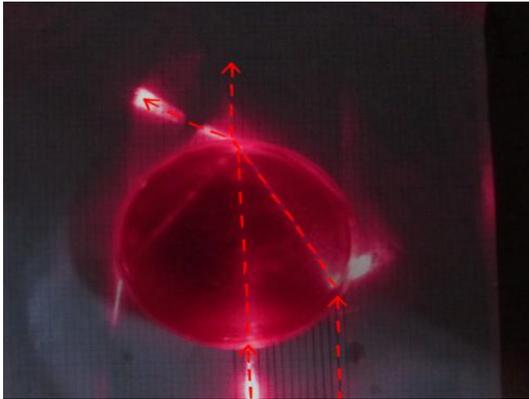


圖 22:雷射光通過紅墨水的折射路徑

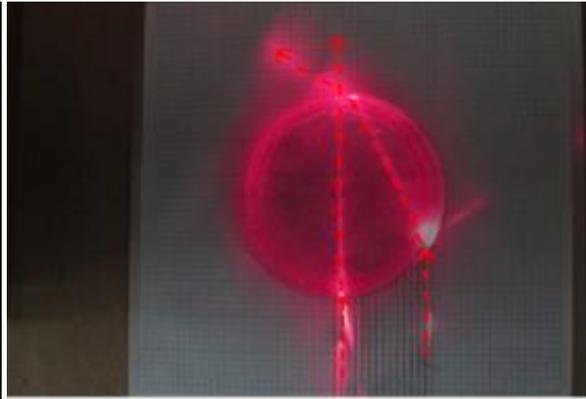


圖 23:雷射光通過紅色壓克力的折射路徑

從圖 22、23 可以發現：

- (1)光從右邊入射，折射後向左偏。
- (2)愈靠右邊入射，向左偏折愈多。
- (3)每個折射發生時必定也有反射產生。



1

2

3

4



5

6

7

8

圖 24:連續不同入射位置的雷射光通過扁圓柱形壓克力的折射路徑

從以上連續圖形的變化，可以看出：照射位置愈靠近玻璃棒邊緣，反射的量愈多，折射的量愈少。(進入紅色圓形壓克力為折射；向圖片右方者為反射)

為說明光線折射路徑，就必須使用折射定律：

原理:根據 Snell 定律(如下)，探討水及保麗膠模型的折射率

$$\text{Snell 定律: } n_1 \cdot \sin(\text{入射角}) = n_2 \cdot \sin(\text{折射角})$$

即介質一的折射率乘 $\sin(\text{入射角})$ 等於介質二的折射率乘 $\sin(\text{折射角})$ ，如圖九，已知空氣的折射率為一，得

$$n_2 = \sin(\text{入射角}) / \sin(\text{折射角})$$

測量在不同入射角與折射角下(不含光通過圓心時)，不同物質的折射率，共測量 15 組數據，每次向培養皿邊緣移動約 5mm。

測量角度的方法：用相機拍攝雷射光行進路徑，再使用廣泛使用的 USB 數位顯微鏡附贈程式測量角度，先練習測量水的折射率為 1.33，確認測量方法可行之後，再測量出保麗膠模型的折射率。

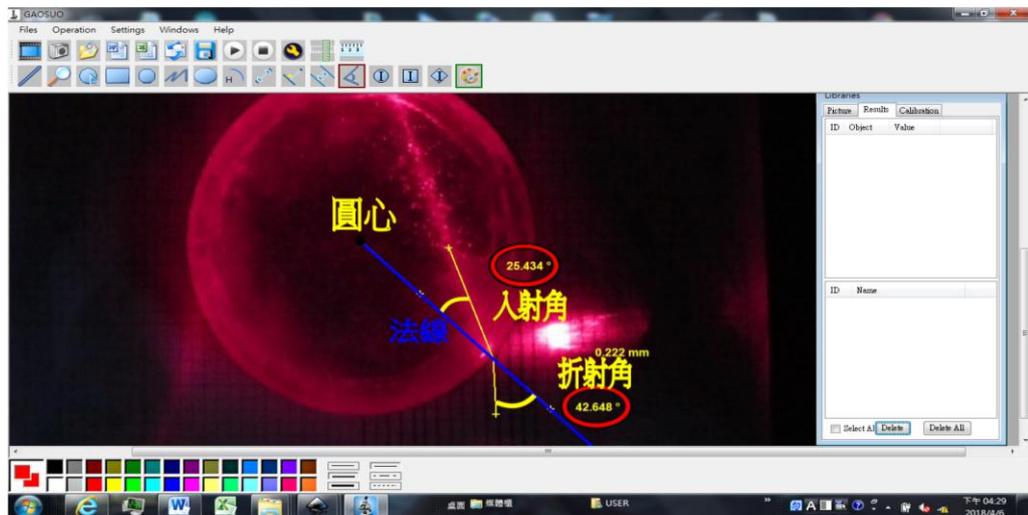


圖 25:測量入射角折射角的方法

在不同入射角，水及壓克力的折射率測量結果如下：

入射角	壓克力的折射率	入射角	水的折射率
7.123	1.588541633	5.33	1.32241869
11.924	1.59200744	7.238	1.378237598
16.042	1.602654007	10.62	1.303174839
18.014	1.616518394	13.697	1.382353055
21.592	1.585238617	16.179	1.367133773
28.493	1.601785515	21.994	1.328805928
30.472	1.588182426	24.962	1.290232965
37.235	1.627567604	30.158	1.326674338
40.9	1.57061954	33.632	1.341027852
42.648	1.57750403	40.982	1.297703213
59.288	1.615779276	43.158	1.31334794
69.571	1.600379381	51.575	1.327803048

表 7：改變入射角，測量壓克力(由保麗膠製成)和水的折射率。

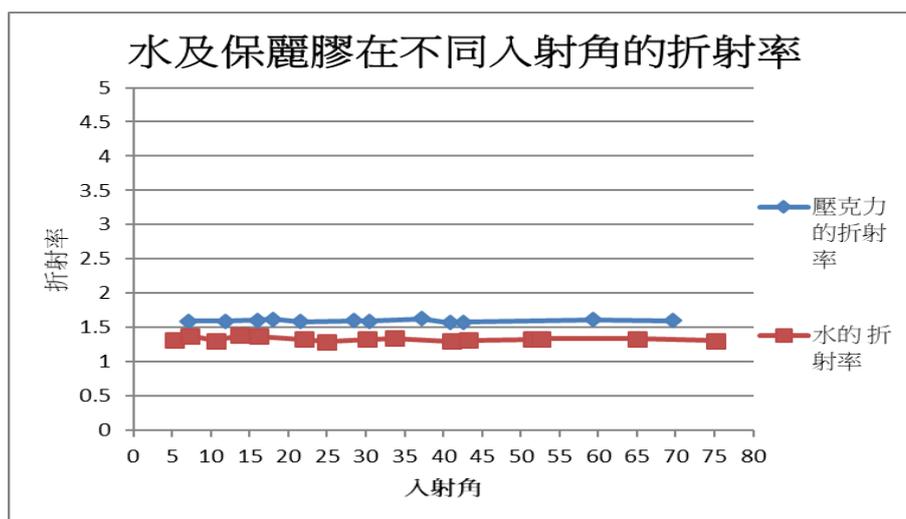


圖 26：水和壓克力(保麗膠製成)不同入射角測到的折射率。

經過 Snell 定律計算後，不論入射角幾度，水的折射率為 1.33 ± 0.05 。而保麗膠的折射率為 1.59 ± 0.03 。

二、 探討光在直立玻璃棒中的行進路徑:

(一)利用自製的保麗膠模型模擬光在玻璃棒中的行進路徑，並觀察。

將雷射光照到靠近模型圓心時及照到邊緣時的二張照片疊加，觀察光在不同入射角下的行進路徑，如圖:

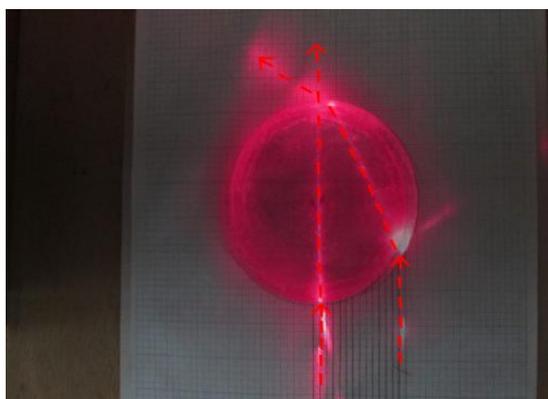


圖 27：分別的兩道雷射光束通過圓形壓克力，路徑疊加圖。可看出更多雷射光線通過後將散開一個角度。

將此圖視為玻璃棒俯視圖，將二束不同的光視為雷射光光帶邊緣，可看見光在折射出模型後，形成交點並散開成一個角度，投射在布幕上時，即水平散開成「一」字狀。

(二)根據討論一結果，光照到保麗膠模型邊緣時折射的角度大，照到接近圓心時折射的角度小，因此當雷射光照到玻璃棒邊緣時，散開的角度較照到接近圓心時散開的角度大。如下圖所示。

(三)若玻璃棒越細，光照到玻璃棒的表面積越大，則水平散開的角度也越大(如圖 27)。

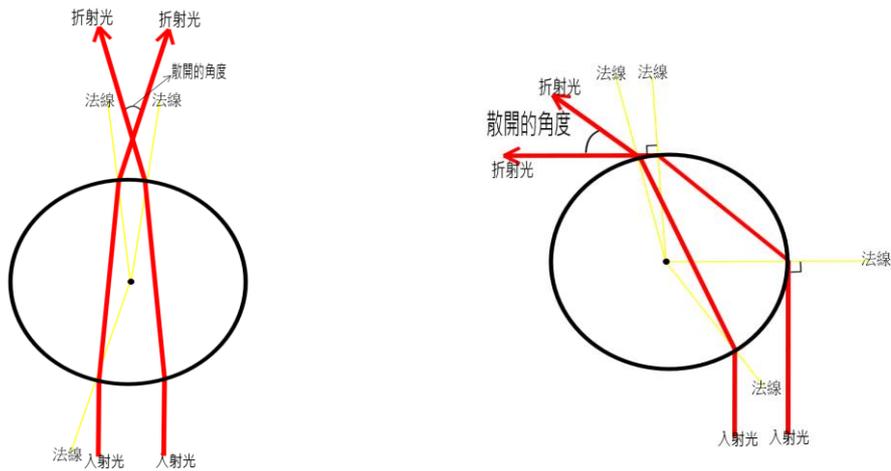


圖 28：雷射光束照到玻璃棒的表面積越大，則散開的角度也越大示意圖。

(四)如果有機玻璃棒細到跟雷射光粗細一般，雷射光同時照到整支玻璃棒，折射光及反射光會呈環形。如圖 29。



圖 29：光成環形，三張圖皆為同一根玻璃棒。近中央處光比較亮，是折射造成；兩側光比較弱，是反射造成。

以下我們自行推演了一個數學公式和作圖方法，可以更精確說明散開角度計算的方法和影響的因素(詳細推論過程請參考附錄一、二)。

公式如下(射玻璃棒半徑 r 、雷射光寬 d 、折射率 n):

雷射光入射玻璃棒中心時，散開的角度為

$$4 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

因為反三角函數無法再化簡，無法從公式上直接理解。

但是正弦 $\sin \theta$ 數值和角度 θ 正相關(不是正比)，所以 $\sin \theta$ 數值相差愈大就表示角度 θ 相差愈大(散開角度愈大)。於是以 $\sin \theta$ 值， $\left(\frac{d}{2r} - \frac{d}{2nr}\right)$ 相減帶入就可以推測散開角度的大小：

$$\text{散開角度正相關於 } \left(\frac{d}{2r} - \frac{d}{2nr}\right) = \frac{d}{2r} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

若 $d < r$ ， r 愈小或是 n 愈大，帶入得到的數值會較大，散開角度也愈大。

可以得知玻璃棒愈細，散開角度愈大。且，同樣直徑為 4mm 的玻璃棒和有機玻璃棒，玻璃棒的折射率大於有機玻璃棒，表示玻璃的折射率大於有機玻璃折射率。

理論上，雷射光被視為平行光束， d 應該是定值，但是實務上很難達到，它會繞射，中心會散開。

雷射光入射玻璃棒邊緣時，散開的角度

$$2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$$

已知在同介質下，公式中前項， $2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right]$ 為一定值，若是公式中後項，

$2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$ 愈小，則散開的角度愈大。

仿照上面討論，以 $\sin \theta$ 值，代入相減就可以推測散開角度的大小：

$$\text{公式後項} : \frac{r-d}{r} - \frac{r-d}{nr} = \frac{r-d}{r} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = \left(1 - \frac{d}{r} \right) \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

若 $d < r$ ， r 愈小，代入後項得到的數值會較小，散開角度也愈大。

理論值玻璃棒中心入射及右邊入射比較表:

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
右	97.26	83.77	79.41	75.85	70.24
中	42.81	26.98	22.87	19.87	15.76

表 8：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度理論值比較。

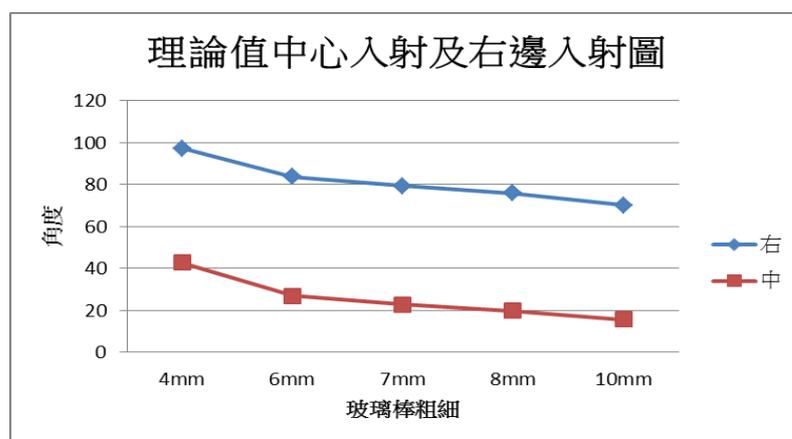


圖 30：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度理論值比較。

由圖 30 可發現，和實驗結果呈現的曲線關係大致相同，玻璃棒越細，散開的角度越大。且由右邊入射較由中心入射散開的角度大。

再將實驗結果及理論值相比較，如下圖表

	4mm	6mm	7mm	8mm	10mm
理論值右	97.26	83.77	79.41	75.85	70.24
實驗值右	89	70	65	58	48
實驗值中	74	42	34	32	25
理論值中	42.81	26.98	22.87	19.87	15.76

表 9：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度的實驗值和理論值比較。

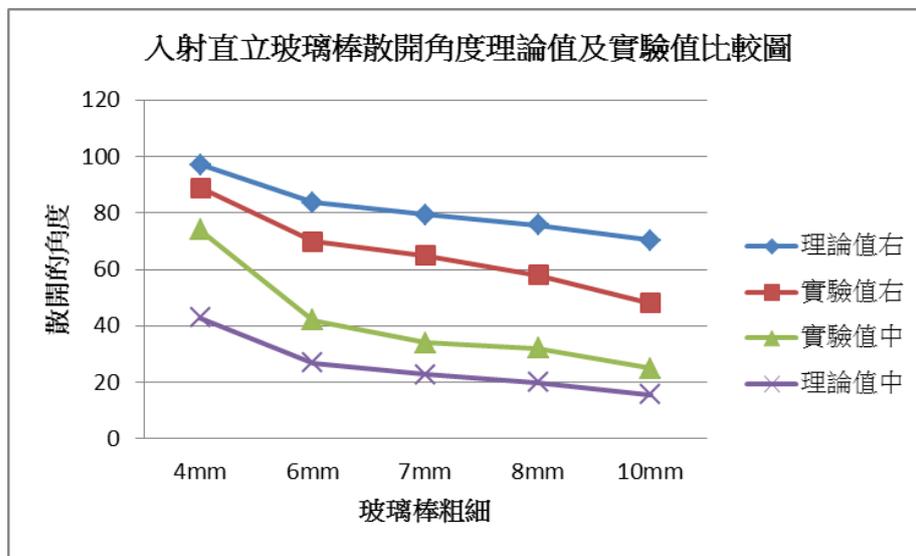


圖 31：從玻璃棒中心入射及最右邊入射，散開角度的實驗值和理論值比較。

將理論值及實驗值比較後卻發現:

1. 雷射光由中間入射玻璃棒時，實驗值較理論值大。
2. 雷射光由右邊入射玻璃棒時，實驗值較理論值小。

推測原因如下:

1. 雷射光由中間入射玻璃棒時，因為雷射光非平行光，因此照射到遠的地方，會比照射近的地方時，雷射光寬度還大，只是極不明顯，通過玻璃棒後散開的角度也變得更大，使的實驗值較理論值大。
2. 雷射光由右邊入射玻璃棒時，因為當雷射光越接近玻璃棒邊緣入射，也就是入射角接近九十度時，反射的亮度會比折射的亮度還要亮許多，也就是折射穿過玻璃棒的光更少，所以我們用同一標準測量折射光散開的角度時，就會忽略一些肉眼看不到，更暗的光。再加上我們在測量時，為了確保雷射光已經是最邊緣入射，因此沒有使

整束雷射光都照到玻璃棒(如圖 32 所示)，導致雷射光小於原本的寬度，實驗值才會比理論值小。



圖 32：雷射光照射玻璃棒邊緣，漏出些微的光，使得照到玻璃雷射光小於原本的寬度。

三、探討光在傾斜玻璃棒中的行進路徑：

在煙霧箱當中放入自製的保麗膠模型(紅色壓克力棒)並傾斜，模擬當光非垂直入射玻璃棒時，觀察雷射光在空氣和壓克力中的行進路徑。

(一)細保麗膠(壓克力棒)模型的行進路徑：雷射光從壓克力棒左緣入射

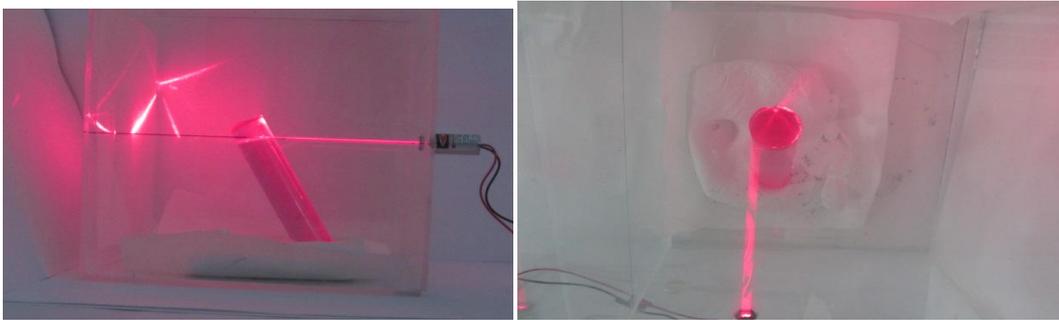


圖 33：雲霧箱觀測細壓克力棒側視圖圖 34：雲霧箱觀測細壓克力棒俯視圖

(二)粗保麗膠(壓克力)模型的行進路徑：雷射光從壓克力棒左側入射

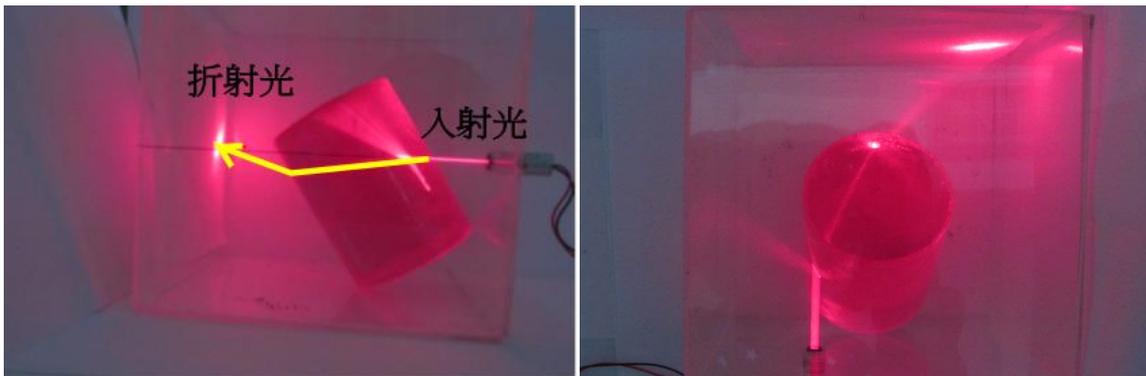


圖 35：雲霧箱觀測粗壓克力棒側視圖圖 36：雲霧箱觀測粗壓克力棒俯視圖

- (1) 從側視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面略往下降，通過壓克力後往上升
- (2) 從俯視圖可以看出雷射光在壓克力棒裡面向右偏折，通過壓克力後再往右偏，越過玻璃棒中心線。這很像雷射通過水平放置的紅墨水或是扁的壓克力模型狀況。

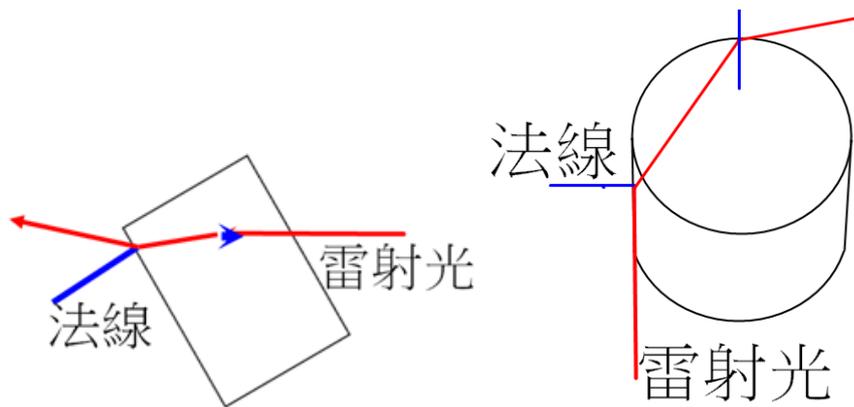


圖 37：光通過壓克力棒，偏折在不同位置的行進方向和法線示意圖。



圖 38：光通過壓克力棒，偏折在不同位置的行進方向和法線關係。

(1)如果從玻璃棒中央位置入射：

從側面看，進入和離開壓克力棒時法線平行，光線只是向下偏移一點，基本上保持直線前進。所以即使玻璃棒傾斜，從玻璃棒正中央水平入射的雷射光高度不變，所以從傾斜玻璃棒中央入射的上揚角度小。

(2)從玻璃棒邊緣(以左側為例)位置入射的光：必須把光線和法線(垂直於圓柱面的入射位置)的夾角分成鉛直方向的夾角和水平方向的夾角。

當雷射光從左側邊緣入射紅色壓克力棒，此時法線幾乎與雷射光在同一水平面上，鉛直方向夾角幾乎等於零，水平方向夾角幾乎等於 90 度，所以幾乎只是向右偏折，沒有向下偏折。

當光線從壓克力棒穿出時，此時法線向下，折射角變大，於是會向上揚起。

四、干涉條紋

在先前的實驗中，討論了雷射光在玻璃棒及有機玻璃棒中的折射，並發現越細的玻璃棒或有機玻璃棒，光通過後的散開角度也越大。因此我們又用了更細的釣魚線，想看看光通過釣魚線的情形，卻意外看到光不但散開呈一字，還分成一節一節的，如圖。所以，我們決定開始探討這個現象。

不過因為只有中間才有較明顯的干涉條紋，因此原則上只討論中間。

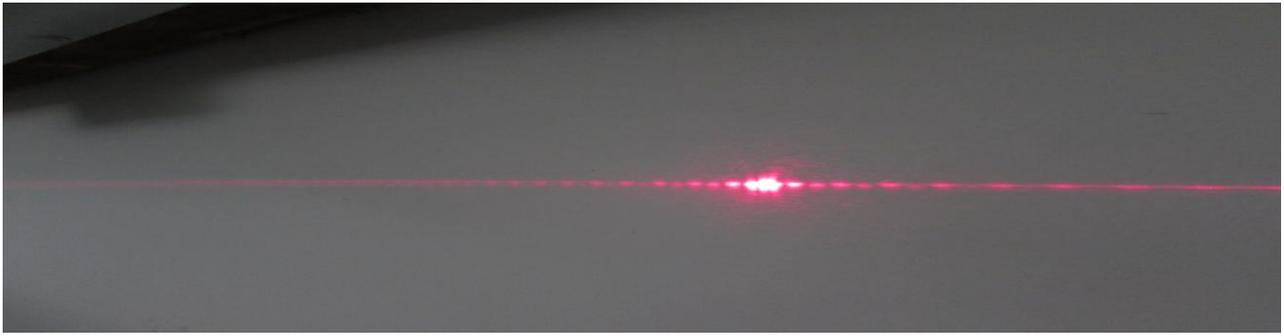


圖 39：雷射光通過釣魚線，散開成一字且產生干涉條紋。

我們用了幾款不同粗細的釣魚線(標示直徑)，看看分節現象有何不同。

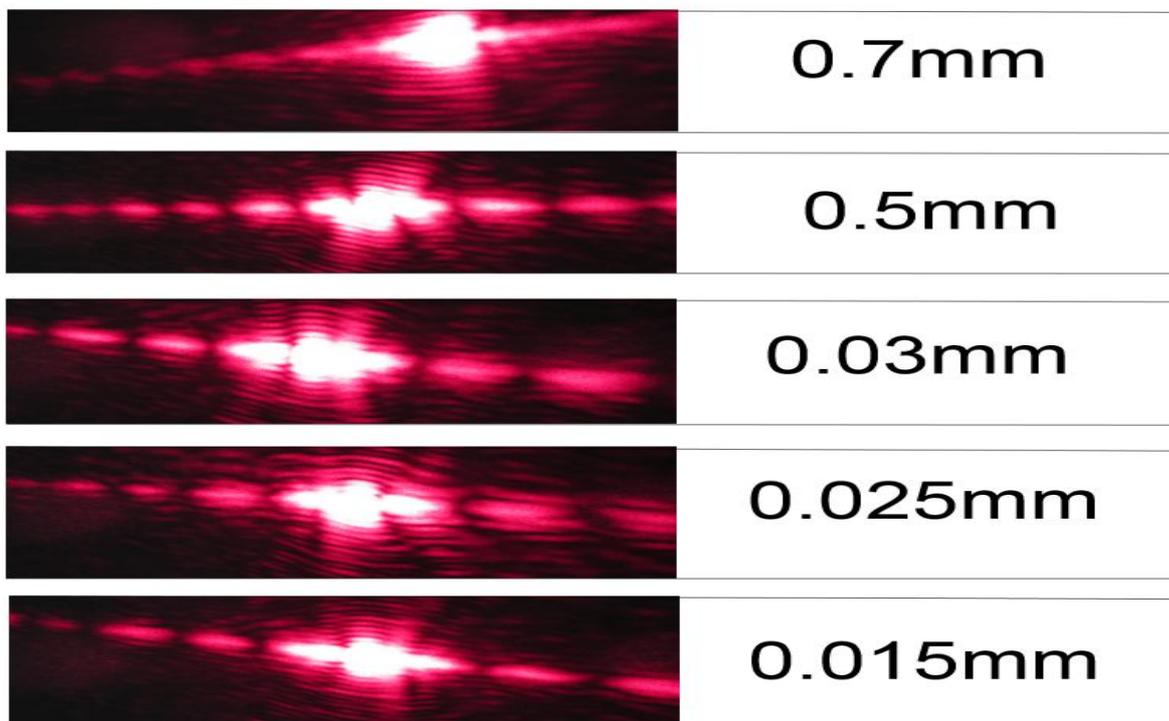


圖 40：比較雷射光通過粗細不同釣魚線的干涉圖形。

釣魚線粗細(mm)	間距
0.015	2.5mm
0.025	1.5mm
0.03	0.5mm
0.5	0.3mm
0.7	0.015mm

表 10：不同直徑釣魚線，干涉條紋分節的間距

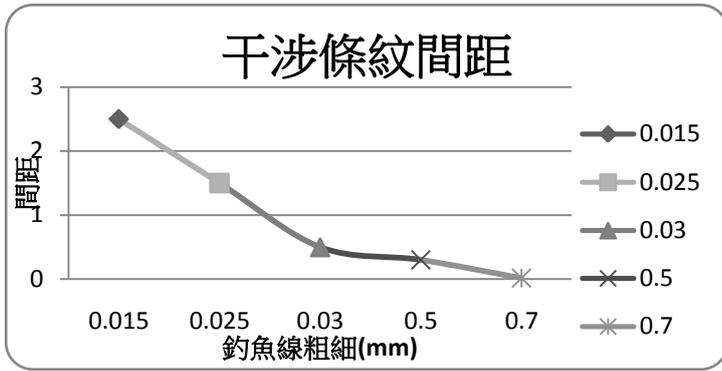


圖 41：不同直徑釣魚線，干涉條紋分節的間距

由上圖可發現，越粗的釣魚線，二個節中間的距離越小，越細的釣魚線，距離則越大。

產生干涉條紋，推測原因如下：

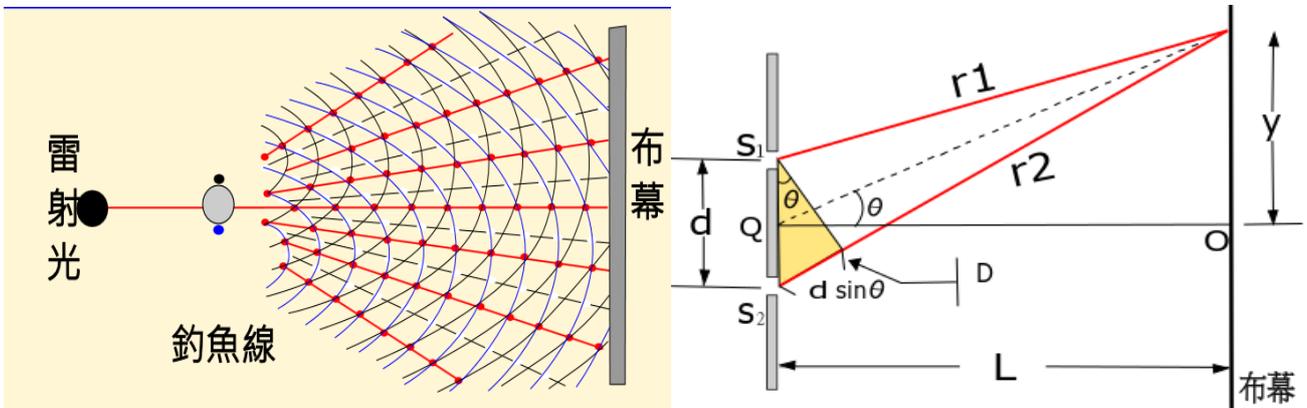


圖 42：通過雙狹縫後的光波和光線示意圖

通過雙狹縫的兩道光，變成新波源，向四面八方輻射出光波。

1. 原理說明:根據楊氏雙狹縫理論，當雷射光通過雙狹縫，可視為兩個新的波源，在遠方產生重疊，因為雙狹縫到後方布幕的距離有所不同，兩道光到達的距離不同，出現的路程差距稱為波程差。
2. 偏折的角度 θ 極小，在靠近中心處遠方布幕(原本雷射光行進的路徑)，波程差幾乎等於 $d \sin \theta$ ，且 $d \sin \theta$ 幾乎等於 $d \tan \theta = d \cdot \frac{y}{L}$
3. 如果波程差為 $(\frac{1}{2} + n)$ 個波長，由原本的全部都是同為波峰或同為波谷，變為波峰對波谷，造成破壞性疊加，出現暗紋及的干涉條紋。

4. 所以波程差每間隔 1 個波長 λ ，會出現一的暗紋，所以 d

• $\frac{y}{L} = \lambda$ ，於是暗紋間隔 $y = \frac{L\lambda}{d}$ ，d 愈小，愈能看清楚分節現象。

5. 如圖 43 所示，b 入射光經過折射後，和 a 反射光都向右方偏折，能夠在後方布幕上重疊，產生亮紋及暗紋。

6. 若釣魚線夠細，可以將釣魚線半徑當成雙狹縫，只要雙狹縫距離夠短，釣魚線半徑夠小，也會在後方布幕上看到干涉條紋。我們拍攝粗細不同釣魚線對雷射光產生的干涉條紋間距變化趨勢支持了這個預測。

也就是說干涉現象是靠近釣魚線中心折射的光(例如左側靠近中心)和從另一側邊緣反射的光(例如右側邊緣，如圖 43 所示)，這兩道光在遠處微偏向右側疊加，產生干涉條紋。

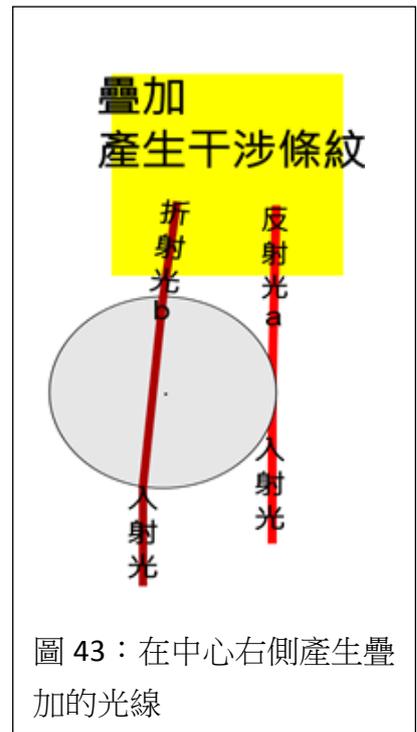


圖 43：在中心右側產生疊加的光線

我們推論：如果能消除兩道光線中的一道光線，就能阻礙兩光線疊加，就能消除干涉條紋。

方法是：1. 用黑色油漆筆把釣魚線右側塗黑，消除從右側**反射**的雷射光。(如圖 44、46 所示)

2. 使細玻璃管中充滿黑墨水，消除靠近中心處**折射**的雷射光。(如圖 45、47 所示)



圖 44：黑色油漆筆把釣魚線右側塗黑



圖 45：細玻璃管中充滿黑墨水

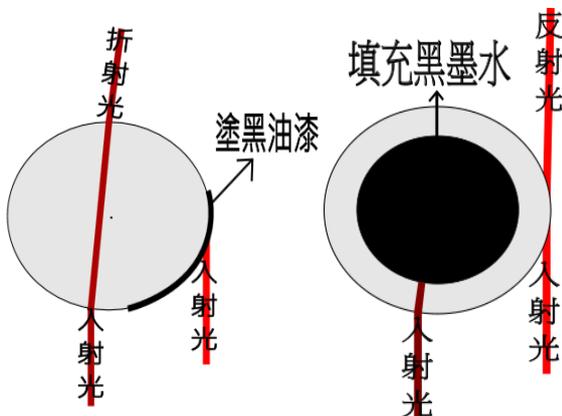


圖 46：釣魚線右側塗黑阻擋反射光示意圖

圖 47：細玻璃管中墨水阻擋折射光示意圖

實驗的結果如下圖所示

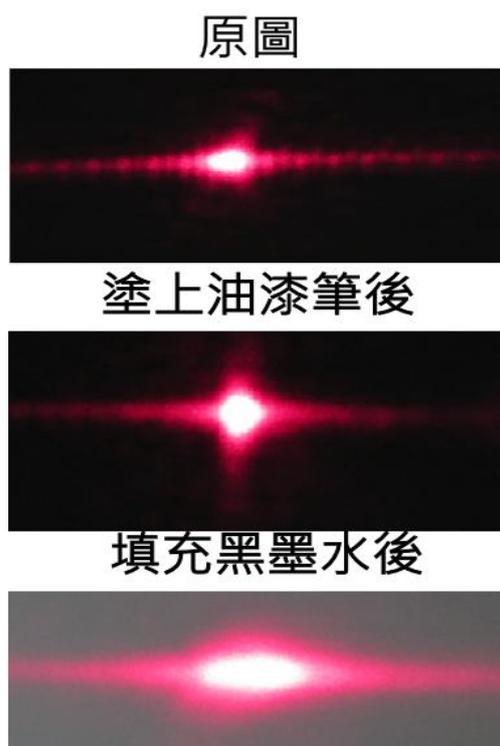


圖 48：消除反射或折射光線其中之一後，干涉條紋消失

此實驗結果可以驗證我們的假設

但是當我們使用更細的釣魚線，仿照之前的方法，也使用油漆筆將釣魚線一側塗黑，想看看是否也能成功消除干涉條紋，結果卻發現無法消除。

推測原因如下：

因為釣魚線過細，比雷射光還細，因此，釣魚線二側為雙狹縫，光通過狹縫後在布幕上產生干涉條紋，此時不論有沒有將釣魚線一側塗黑，皆對產生干涉條紋沒有影響。我們對細漆包線照射也會產生干涉條紋，原因相同。

所以要用以上的方法消除干涉條紋，前提是雷射光不行照到釣魚線以外，雷射光束要夠細或是釣魚線要稍微粗。

我們還好奇地使用了外徑 1mm 的玻璃管，想看干涉條紋有甚麼差異。意外發現干涉條紋和釣魚線的不同。釣魚線的干涉條紋，是中間明顯二邊不明顯；玻璃管的干涉條紋反而是兩邊比較明顯，中間不明顯。推測通過釣魚線後，二邊反射的劑量較少，所以雖然有疊加，不過看不出來。但是(圖 49)的玻璃管，干涉條紋卻是中間不明顯二邊明顯。

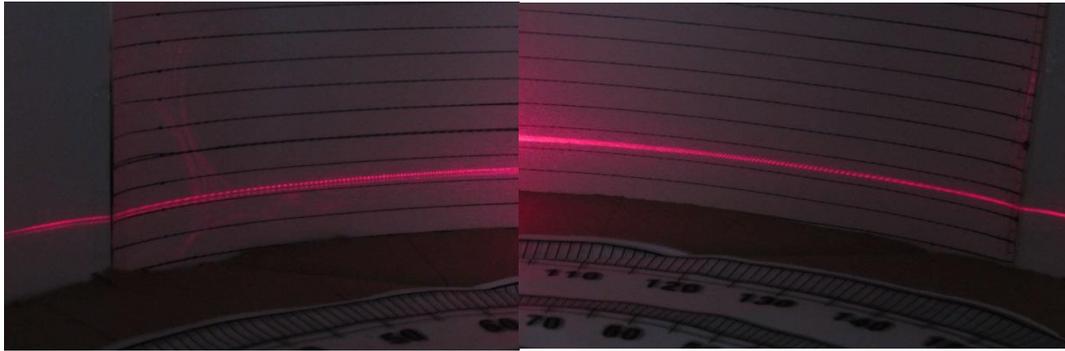


圖 49：雷射光通過細玻璃管後分別在布幕左右兩側產生明顯的干涉條紋

推測原因如下:一束平行的雷射光由(圖 50)下方入射玻璃管，通過中間空氣的光線軌跡

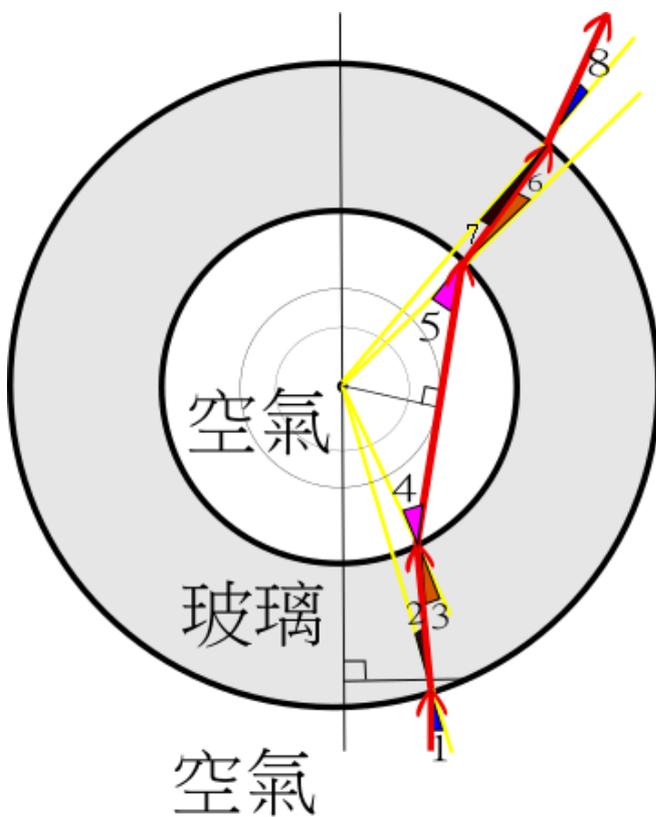


圖 50：雷射光通過玻璃管內空氣，折射後呈發散狀態

使用附錄二的作圖方法，模擬雷射光在玻璃管中的行進路徑(如圖 50 所示)，原本要折射到左邊的光，經過空氣後，反而折射到右邊，所以通過管內空氣的雷射光會有向兩側散開的傾向。

因此我們推測二邊干涉較明顯的原因如下:主要由相鄰的兩束折射光線(圖 51，a 和 b)疊加。

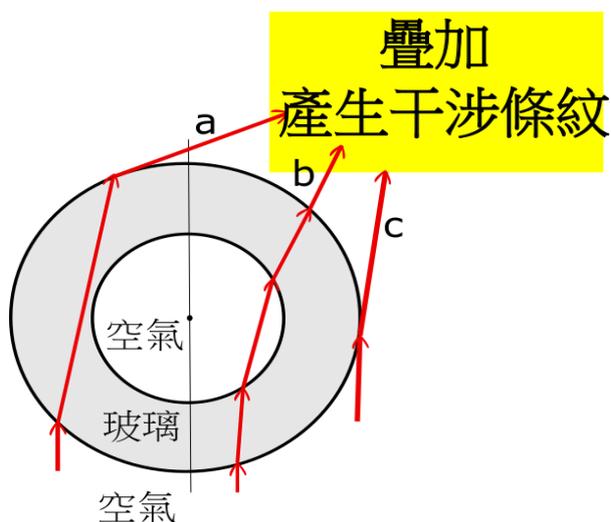


圖 51：玻璃管折射反射光線的軌跡

a 折射光、b 折射光、c 反射光在後方布幕重疊，產生干涉條紋，由於 a、b 折射光二者劑量旗鼓相當，就沒有像發生在釣魚線中，反射光太弱的問題。

所以，若要增強干涉條紋，可以採用細玻璃管做干涉實驗。

柒、結論

1. 玻璃棒愈細，雷射光照射時散開的角度愈大，投射出來的一字和玻璃棒垂直。
2. 雷射光照玻璃棒邊緣比照設玻璃棒中央散開的角度大。
3. 雷射光照傾斜玻璃棒，會使的雷射光彎曲。玻璃棒愈細，雷射光彎曲程度愈大；玻璃棒傾斜程度愈大雷射光彎曲程度愈大。
4. 當玻璃棒傾斜，雷射光照傾斜玻璃棒邊緣仍然比照設玻璃棒中央散開的角度大。
5. 不論玻璃棒傾斜與否，雷射光照玻璃棒邊緣，雷射光反射的量愈大，折射的量愈少。
6. 雷射光通過細釣魚線產生的干涉現象，是通過釣魚線折射的光線和從釣魚線邊緣反射的光線，由這兩道光線產生的疊加作用。
7. 越細的釣魚線，干涉條紋的間距越大；干涉現象愈明顯。
8. 使釣魚線表面部分塗漆以遮蔽反射光線；或是使細玻璃管內充滿黑色墨水遮蔽折射光線，都能**消除**細釣魚線或細玻璃管產生的干涉現象。
9. 通過玻璃管內空氣的光線有發散現象，這和另一側只經玻璃折射的光線偏折方向相同(如圖 5 的 a 和 b)，投射到遠端產生**更加明顯**的干涉現象。

捌、參考資料

1. 折射率-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%8A%98%E5%B0%84%E7%8E%87>

2. 二氧化矽的物理性質-中鎢在線

<http://cn.chinatungsten.com/big5/Si/eyhgdwlxz.html>

3. 不飽和聚脂樹脂-中國複合材料網

http://www.ourfrp.com/top/02/ourfrp_02_01.htm

4. 壓克力（有機玻璃）的折射率是多少？-知乎

<https://www.zhihu.com/question/20432125>

5. 請問有機玻璃折射率是多少-百度知道

<https://zhidao.baidu.com/question/476899056.html>

6. 生活勇者系列番外篇 1——保麗膠灌模經驗(保利膠、保力膠)-痞客邦@卡美拉星球

<http://mimi62211.pixnet.net/blog/post/29273594-%E7%94%9F%E6%B4%BB%E5%8B%87%E8%80%85%E7%B3%BB%E5%88%97%E7%95%AA%E5%A4%96%E7%AF%871%EF%BC%8D%EF%BC%8D%E4%BF%9D%E9%BA%97%E8%86%A0%E7%81%8C%E6%A8%A1%E7%B6%93%E9%A9%97%28%E4%BF%9D>

7. 廣華電子商城-一字紅光雷射模組(直線)->1mW DC3V 紅色一字雷射頭

<http://shop.cpu.com.tw/product/45270/info/>

8. 折射定律-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%96%AF%E6%B6%85%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

9. 司乃耳定律（Snell's Law）-科學 online 高瞻自然科學教育資源平台

<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=1239>

10. 雙縫實驗-維基百科，自由的百科全書

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%99%E7%B8%AB%E5%AF%A6%E9%A9%97>

11. 波動光學

<http://www.scu.edu.tw/physics/science-scu/M302/19.htm>

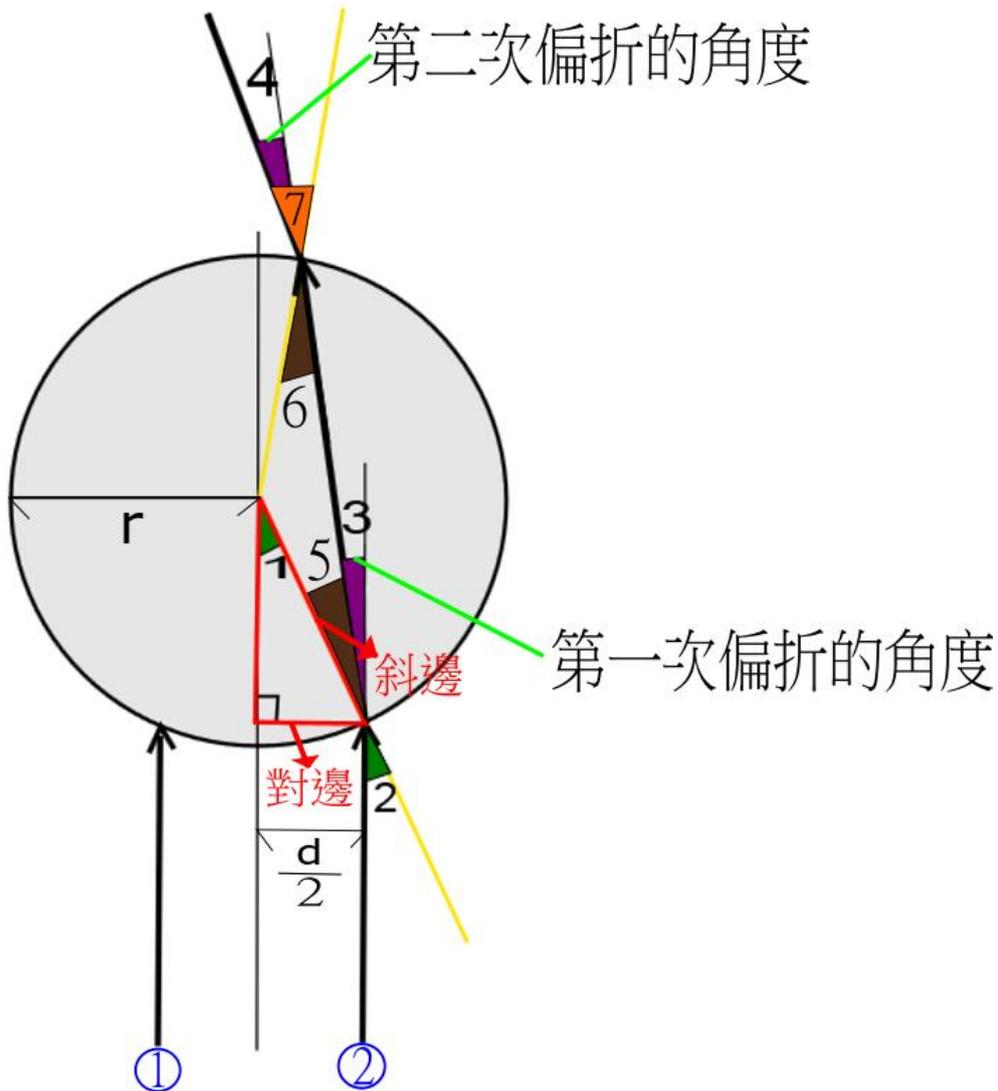
12. 國中自然與生活科技，第三冊，第四章

玖、附錄

附錄一、使用工程計算機，根據折射定律規範的入射折射關係求出雷射光(當成一條線)行進路徑上的偏折角度，再根據一束雷射光邊緣兩側的偏折角度差求散開角度。

一、雷射光由玻璃棒中心及右邊入射時，散開的角度計算公式

(一) 雷射光由玻璃棒中心入射時，散開的角度計算公式:



原理說明:①、②為雷射光束的邊緣，寬度 d ，對稱於中央線

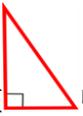
1. 設玻璃棒半徑為 r ，折射率為 n ；空氣折射率為 1。
2. 圖中， θ_2 為入射角， θ_5 為折射角。

根據 Snell's 定律： $1 \cdot \sin \theta_2 = n \cdot \sin \theta_5$

2. 因為雷射光平行於中央線，所以入射角 θ_2 等於圓心角 θ_1 。

所以， $1 \cdot \sin \theta_1 = n \cdot \sin \theta_5$

$$\sin \theta_1 = n \cdot \sin \theta_5$$

3. 在  中 $\sin \theta_1 = \frac{\text{對邊}}{\text{斜邊}} = \frac{d/2}{r} = \frac{d}{2r}$ 代入上式，得

$$\frac{d}{2r} = n \cdot \sin \theta_5$$

$$\text{所以，} \sin \theta_5 = \frac{d}{2nr}$$

$$\text{所以，} \theta_5 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \quad \text{且} \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right)$$

4. 雷射光②從空氣入射玻璃圓柱，向左偏折了 θ_3 的角度 $= (\theta_2 - \theta_5) = (\theta_1 - \theta_5)$

$$\text{所以一次偏折的角度} = \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

5. 因為圓半徑相等的關係，所以 $\theta_6 = \theta_5$ ，且因為折射率相對不變，所以 $\theta_2 = \theta_7$

因此第二次折射再向左偏折的角度和第一次偏折的角度相同

所以雷射光②通過玻璃棒過程中連續向左偏折 2 次，總共偏折角度為：

$$2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

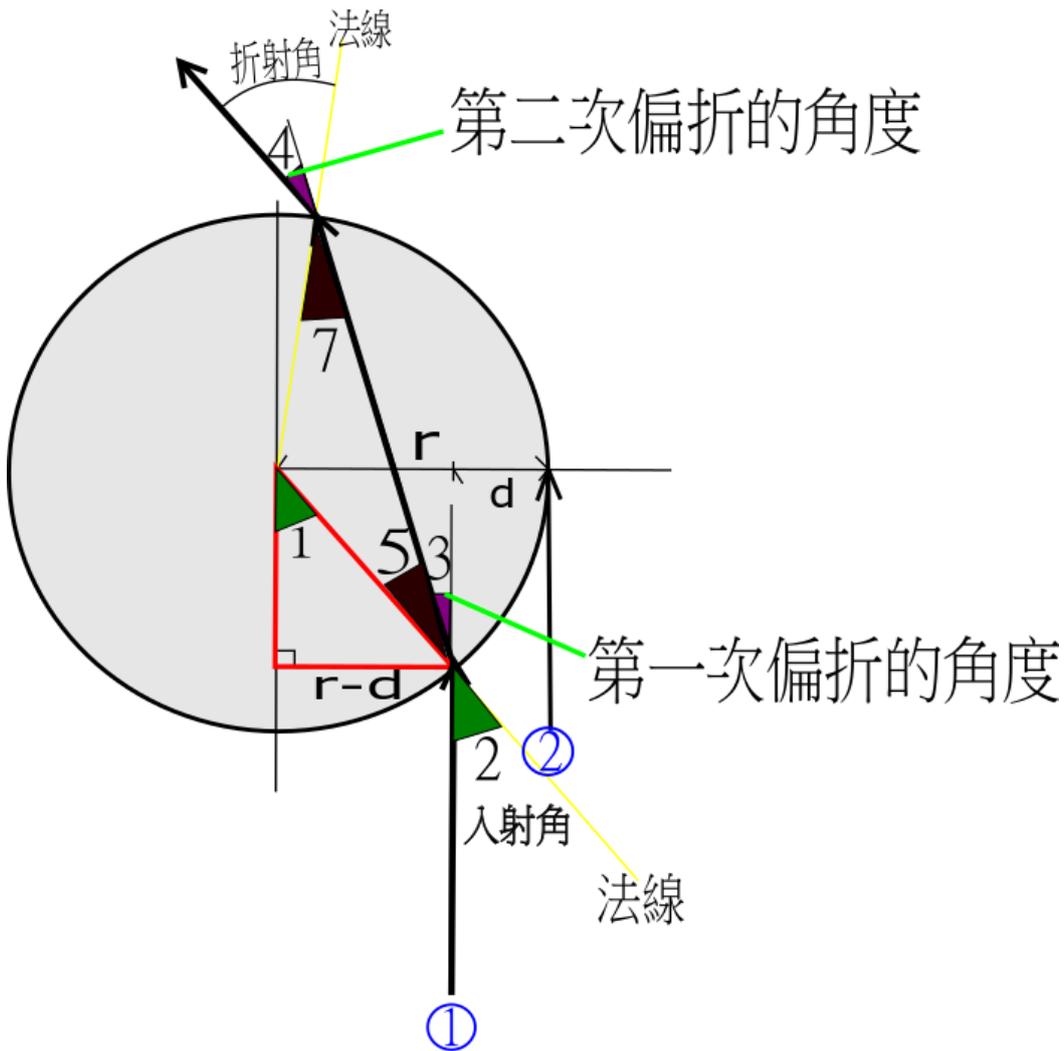
6. 又因為雷射光①通過玻璃棒過程中也連續向右偏折 2 次，總共偏折角度也為：

$$2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

左右二邊對稱，所以原本平行(夾角 0 度)的兩條細光線通過圓柱形玻璃棒中央後，他們的夾角(相當於光帶散開的角度)變成 2 倍，公式整理如下：

$$\text{散開角度} = 4 \left[\sin^{-1}\left(\frac{d}{2r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{d}{2nr}\right) \right]$$

(二)雷射光由玻璃棒右邊入射時，散開的角度計算公式:



上圖為由玻璃棒最右邊入射

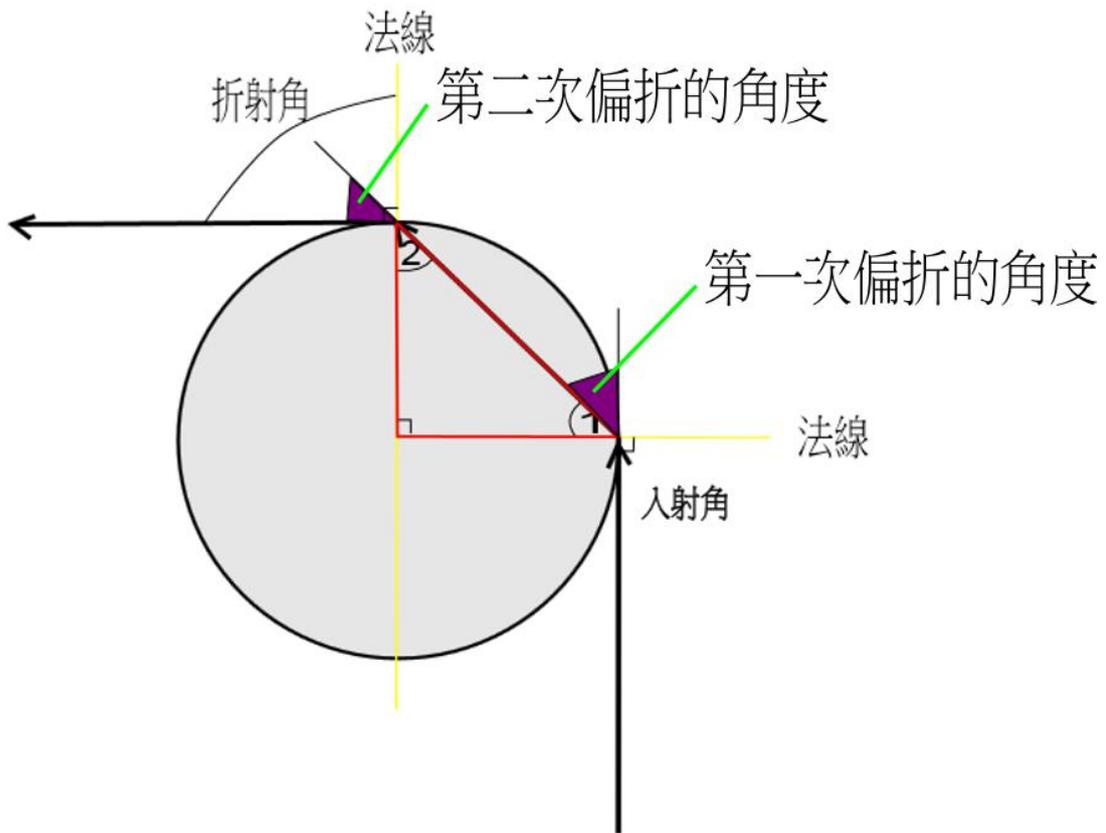
原理說明:①、②為雷射光束的邊緣

1.設玻璃棒半徑為 r ，雷射光的寬為 d ，折射率為 n 。

2.二紫色角相加($\theta_3 + \theta_4$)為雷射光①總共偏折的角度，且二角相等

仿照從中央入射的過程，雷射光①總共偏折的角度 = $2 [\sin^{-1}(\frac{r-d}{r}) - \sin^{-1}(\frac{r-d}{nr})]$

3. 雷射光②從玻璃棒最右緣入射，再畫一張圖來說明他的偏折角度如下：



4.當雷射光照到玻璃棒最邊緣時，入射角是 90 度，二紫色角相加為偏折角度

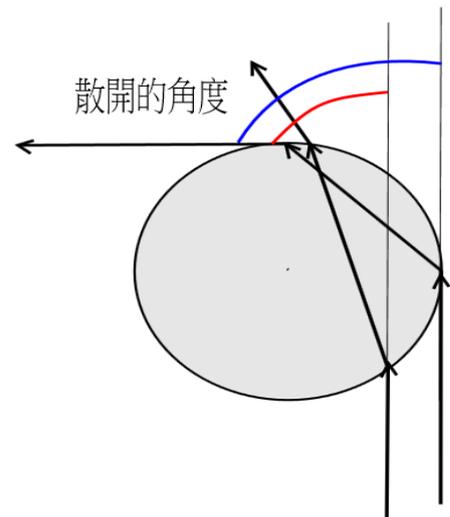
5.已知 $\sin(90^\circ)$ 為 1，根據 Snell 定律化簡可得折射角為

$$\text{折射角 } \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right)$$

3.入射角減折射角為偏折角度，連續偏折 2 次後為總共偏折角度為：

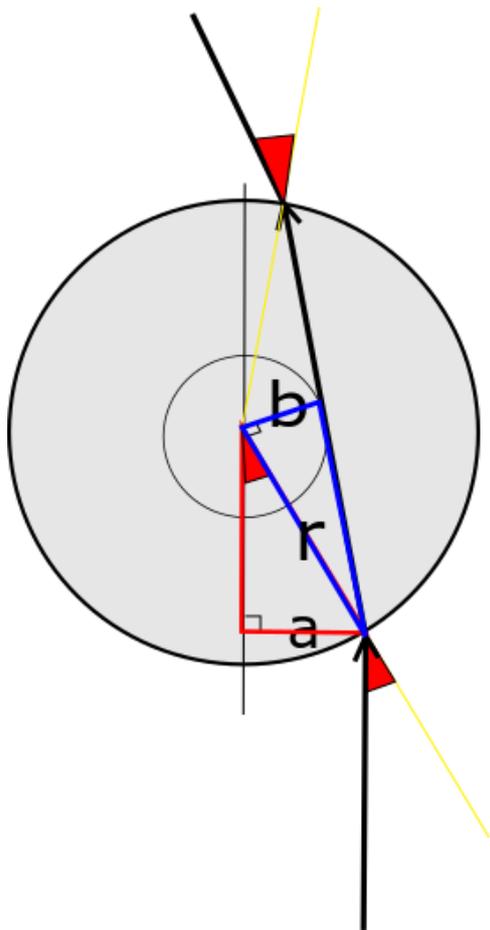
$$2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right]$$

4. 因為 2 道雷射光束都向左偏折，所以偏折後的夾角(散開的角度)必須相減，如下圖所示，其結果為：



$$\text{散開角度} = 2 \left[90^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 2 \left[\sin^{-1}\left(\frac{r-d}{r}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{r-d}{nr}\right) \right]$$

附錄二、使用尺規作圖，根據折射定律規範的入射折射關係，再運用切線垂直於切點和圓心的連線，畫出雷射光(當成一條線)行進路徑上的偏折路徑，再根據一束雷射光邊緣兩側的偏折角度差，使用量角器得到散開角度。



1. 如上圖所示，在  中 $\sin(\text{入射角})$ 為 $\frac{a}{r}$ ，

根據 Snell's 定律： $1 \cdot \sin \text{入射角} = n \cdot \sin \text{折射角}$

$$1 \cdot \frac{a}{r} = n \cdot \sin(\text{折射角})$$

2. 在  中 $\sin(\text{折射角})$ 為 $\frac{b}{r}$ ，代入上式

$$1 \cdot \frac{a}{r} = n \cdot \frac{b}{r}$$

所以， $b = \frac{a}{n}$

因為折射率 $n > 1$ ，所以折射後偏向圓心，距離 b 變短了

3. 先用直尺測量得到 a 值，除以折射率 n 得到 b 值，並利用圓規以 b 為半徑畫圓，並從入射點向圓的邊緣作切線，畫出光的折射路徑。



4. 因為圓半徑相同，故綠色三角形為等腰三角形，第二次入射角和第一個折射角相等，根據對稱，折射回到空氣中會偏離法線，在法線上離入射點 r 的位置為圓心，以 a 為半徑作圓，沿著圓的切線可畫出第二次折射光的折射路徑，如圖所示。

5. 以相同的作圖法則，再畫出第二條線的折射路徑，就可以用量角器測量兩條線之間的夾角(散開的角度)

※ 這樣作圖的優點是可以不必使用工程計算機計算，在視覺上理解光線的偏折狀況。

